

高炉羽口からの粉体吹き込みと炉下部温度の制御に関する研究

著者	国友 和也
号	3214
発行年	2003
URL	http://hdl.handle.net/10097/8486

	くにともかずや
氏 名	国友和也
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成16年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 金属工学専攻
学位論文題目	高炉羽口からの粉体吹き込みと炉下部温度の制御に関する研究
指導教官	東北大学教授 八木 順一郎
論文審査委員	主査 東北大学教授 八木 順一郎 東北大学教授 日野 光元 東北大学教授 谷口 尚司 (環境科学研究科)

論文内容要旨

資源・エネルギーへの対応が産業界への社会的要請となっている今日、鉄鋼業なかでも高炉を中心とした製鉄工程の効率化を図ることは緊急の課題である。このためには、羽口部から各種炭材や粉鉱石を吹き込み、資源・エネルギー対応力の向上を指向する必要がある。特定の炭種に依存せず、幅広い石炭の中からコークス比の削減が可能なものを燃焼性を維持しつつ吹き込むことが、その目的に合致する。また、天然ガス等、より炭素分の少ない還元材で資源的に豊富で焼結鉱原料としては使いづらい粉鉱石を部分還元して高炉に吹き込むことにより高炉の還元材比の低下、生産性の向上を狙うことが可能であると考えられる。また、この際、熱および通気の制約のある高炉の炉下部において、いかに安定的に燃焼・還元・溶融させることができるかが課題となる。

以上の課題認識のもとに、羽口からの低揮発分炭を吹き込むことにより高炉還元材比を低減するとともに、高揮発分炭もあわせて吹き込むことにより燃焼性の改善を図る方策に関し検討を加えた。また、部分還元鉱石製造時の生産性やエネルギー原単位、部分還元鉱石高炉使用時の炉下部状況の変化や製鉄トータルエネルギーの変化に関する研究を実施した。これら、羽口からの粉体吹き込みは、炉下部、特に炉芯部の温度レベルを低下させる危険性があるため、炉下部温度検知法に関し音速データをCT処理して2次元温度分布を得る測定手法について研究した。また、炉下部・炉芯部の温度低下が検知された場合でも炉下部領域へ有効に着熱させる手段がなかったため、炉芯部分の温度を直接的に回復させる手段として羽口部から炉芯にかけて直接送風もしくは掘削して送風する技術について研究した。

以上の点に関して検討を加えた本研究の要旨は、以下とおりである。

1. 序 論

本研究の背景となる、鉄鋼業の現況に関し、エネルギー、資源の観点から総括するとともに、高炉操業における炉下部研究の位置付けと現況について述べ、高炉炉下部における燃焼、還元の制御と温度検知ならびに制

御に関する研究の意義を明らかにした。

2. 低揮発分炭の効果と燃焼挙動

微粉炭比の上昇にともない、粉の蓄積や燃焼焦点の炉壁側への移動が顕在化し操業が不安定となる場合があり、コークスとの置換率も低下傾向になる。このため、微粉炭の揮発分と高炉の還元材比との関係に関して、炉下部発熱量の概念を導入し検討を加えた。高炉の1400℃以上の領域での微粉炭の有効発熱量という概念に基づき検討した結果、炉下部での熱バランスが律速となっている操業においては、微粉炭の平均揮発分が低い方が還元材比の低減に効果があることを明らかにした。また、堅型円筒燃焼炉での空間燃焼実験により高揮発分炭と低揮発分炭との混合微粉炭の燃焼挙動に関し検討するとともに燃焼シミュレーション解析を行った。その結果、低揮発分炭と高揮発分炭とを混合使用することにより、燃焼温度はそれぞれ単独の場合の加重平均値よりも高温側に偏倚し、特に初期の昇温の促進効果が顕著であることを明らかにした(図1)。これは高揮発分炭が高温の燃焼場を形成し低揮発分炭の燃焼を促進しているためと考えられる。さらに、複数の炭種の混合燃焼挙動の推定が可能な燃焼モデルを策定し、低揮発分炭に対する高揮発分炭の燃焼促進効果を明らかにし、平均揮発分が10%以下では燃焼効率は大幅に低下するため、燃焼の促進には一定以上の高揮発分炭の混合が効果的であるとの結論を得た。また、総酸素量が一定でも微粉炭と同じランスで吹き込まれる酸素は燃焼促進効果が高く、平均揮発分が低い場合には二重管ランスを用いた酸素富加微粉炭吹き込みが有効であるとの結論を得た。

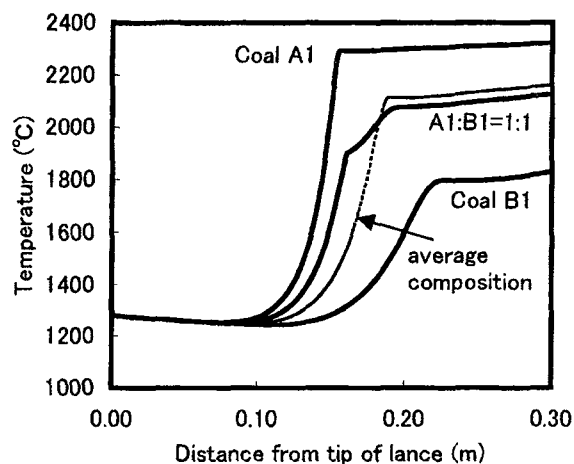


図1. 高揮発分炭(Coal A1)と低揮発分炭(Coal B1)との単独および混合燃焼時の燃焼温度のシミュレーション結果。

3. 部分還元鉱石吹き込み技術の効果と炉下部挙動

羽口からの粉鉱石の吹き込みは、シャフト部における鉱石の還元負荷が軽減されることから高微粉炭比操業においては特に効果的であるが、炉下部における還元負荷が増大する。このため、天然ガスなど炭素含有量の少ないエネルギーを用いて鉱石を部分還元するプロセスと、それを原料として最終還元・溶解を行う高炉プロセスとを組み合わせることにより、銑鉄製造工程におけるエネルギーソースの転換および高炉の負荷を軽減し生産量とフレキシビリティの向上を目指した2段還元システム(図2)について検討した。その結果、還元鉱石の製造プロセスにおいて、高還元率を避け、還元反応速度の高い部分還元に留めることにより、単段の流動還元ブ

プロセスにおいても生産性が高められ
金属鉄あたりの設備コストが低減でき
る可能性があることが明らかになった。
また、高炉での部分還元鉱石の使用
技術に関して、部分還元鉱石を多量
に吹き込めば炉芯温度の低下を招く
可能性があるが、一定の範囲内では
還元材比の低下、生産量の向上、炉
下部通気性の改善が可能であるとの

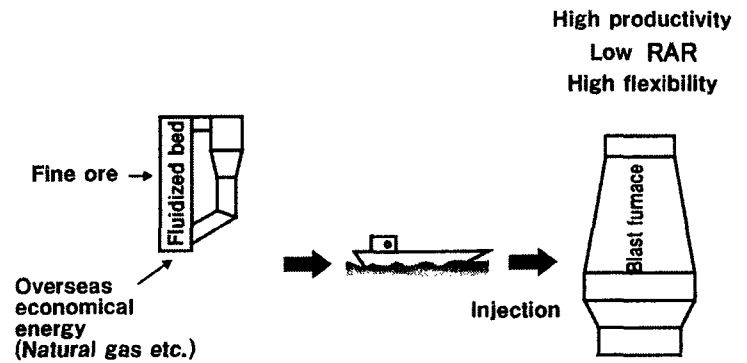


図2. 2段還元システムのコンセプト.

結論を得た。さらに、2段還元システムのエネルギー、炭酸ガスバランスを通常の製鉄プロセスと比較した結果、2段還元システムは既存の高炉製鉄プロセスの省エネルギーがはかれるのみならず、部分還元鉱石製造プロセスまで含めたトータルの溶鉄製造プロセスを考慮してもエネルギーと炭酸ガスの削減が可能であるとの結論を得た。

4. 音波CT法による高炉炉下部温度の検知

以上で検討してきた羽口からの粉体吹き込みは、炉下部、特に炉芯部の温度レベルを低下させる危険性がある。このために、炉下部温度検知法に関し研究した。音速が温度に依存することに着目して、高温充填層内の同一平面上においてさまざまな方向から音波を入射して得られる複数の音速データをCT処理して2次元温度分布を得る測定手法を開発した。まず、オフライン実験により高温充填層内において、音速の温度依存性に関する実験式を求めた。さらに、音速測定装置により、高炉の休風中に複数の羽口から音波(衝撃波)の送受信を行い、得られた音速データをCT処理することにより炉下部の相対的な2次元断面温度分布が測定できることを確認し(図3)、他の操業データとの対比により検証した。

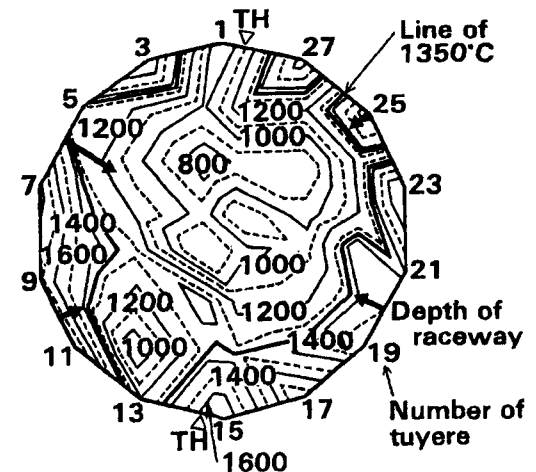


図3. 音波 CT 法による北海2高炉での羽口レベルにおける水平断面温度分布測定事例(単位:℃).

5. 炉芯活性化法による炉芯部温度制御

炉下部・炉芯部の温度低下が検知された場合

でも、従来は全体の還元材比を上昇させるなどの方策を採用するしかなかったが、炉下部領域への着熱効率は低い。このため、羽口前の粉率上昇などによる炉芯部の通気性の悪化、温度レベルの低下などいわゆる高炉炉芯不活性状態解消のための一つ的手段として炉芯送風法を考案し、模型実験や実炉試験を通じて検討を加えた。その結果、炉芯部に直接送風する炉芯挿入送風法のみならず、羽口前から炉芯部にかけて掘削した後、通常の羽口位置から送風する炉芯掘削送風法によっても炉芯部への通気は改善され温度上昇効果が認められることを見出した(図4)。その効果発現の機構は、羽口前から炉芯部にかけてのコークスが再配列し粗充填状態となることや、羽口前粉堆積層が穿孔されることなどによるものと推察される。また、微粉炭吹き込み作業において、一定の炉芯温度以上では炉芯掘削送風法による炉芯温度上昇効果が認められたが、羽口前の粉の堆積が広範囲の場合は効果が発揮できる範囲は狭くなり、炉芯温度レベルが低すぎる時などには大きな効果は発揮できないため、炉芯掘削送風法は比較的早期の炉況回復手段として活用すべきであると結論付けた。さらに、炉芯挿入送風法において、ゾンデ前に未燃チャーなどが堆積している場合は効果が弱まるが、熱を補償しつつ水蒸気を吹き込むと微粉炭素が消費されるため通気性が改善され、温度の上昇をはかることができる可能性があることを示した。また、実炉適用を想定したシミュレーションを行い、ボーリングパイプを炉芯に挿入し送風することにより炉芯に着熱し平均的な炉芯温度を上昇させうるとの検討結果を得たことを踏まえ、実炉において炉芯掘削法を適用した結果、炉床部の熱レベルの改善効果として、炉底カーボンレンガ温度や出滓率の上昇を確認した。

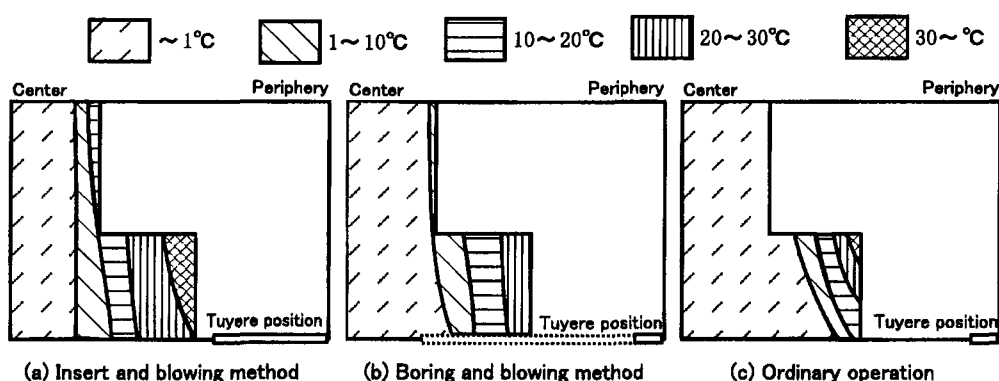


図4. 温間シミュレーターによる、炉芯挿入送風法(a)および炉芯掘削送風法(b)適用時の炉芯部の温度変化の通常操業時(c)との比較(送風温度 50℃上昇後 20 分経過時)。

論文審査結果の要旨

高炉の羽口部から種々の炭材を吹き込みコークスへの依存度を下げる研究や、天然ガスなど炭素分の少ない還元材で粉銹石を部分還元して高炉に吹き込むことにより高炉の効率化を図る研究は省エネルギーおよび環境改善の観点からも重要になっている。また、この際、炉下部温度を低下させる危険性があるため、炉下部温度の検知および制御が重要な課題となるが、十分に検討されているとは言えない。本論文は、高炉羽口からの粉体吹き込み技術と炉下部温度の制御に関する研究を行った結果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、従来の知見、目的、および、意義について述べている。

第2章では、微粉炭の揮発分と高炉の還元材比との関係に関して、炉下部発熱量の概念を新たに導入し、微粉炭の平均揮発分が低い方が還元材比の低減に効果があることを定量的に明らかにしている。また、微粉炭燃焼実験および燃焼シミュレーション解析により、低揮発分炭に対する高揮発分炭の燃焼促進効果を見出している。これらの成果は、より広範な石炭資源の高炉への活用の道を開くとともに、コークス比の削減に寄与するものと判断される。

第3章では、部分還元銹石を吹き込む2段還元システムを提案し、単段の流動還元プロセスにおいても生産性が高められ金属鉄あたりの設備コストが低減できる可能性があることや、高炉に一定範囲内で部分還元銹石を吹き込めば、還元材比の低下、生産量の向上、炉下部通気性の改善が可能であることを実験および理論的検討により明らかにした。また、通常の製鉄プロセスと比較して2段還元システムは、部分還元銹石製造プロセスまで含めたトータルの溶鉄製造プロセスにおいても、エネルギー消費および炭酸ガス放出削減が可能であることを明らかにしている。

第4章では、音速が温度に依存することに着目し、高温充填層において得られた複数の音速データをCT処理して2次元温度分布を得る斬新な測定手法について研究し、音速の温度依存性に関する実験式をもとに、高炉の休風中に複数の羽口から音波の送受信を行い、高炉下部の2次元断面温度分布を得ることにはじめて成功している。

第5章では高炉炉芯不活性状態解消のための手段として炉芯送風法を考案し、模型実験や実炉試験を通じて、炉芯部に直接送風する炉芯挿入送風法のみならず、羽口前から炉芯部にかけて掘削した後、通常の羽口位置から送風する炉芯掘削送風法によっても炉芯部への通気は改善され温度上昇効果が認められることを見出すとともに、実炉においても、その有用性を実証している。

第6章は結論であり、研究全体の総括を行っている。

以上、要するに本論文は、模型実験、数学モデルシミュレーション、実炉試験などの研究手法を駆使し、高炉炉下部への粉体吹き込み技術と炉下部温度の計測および制御技術に関して詳細かつ定量的に解明したもので、高炉の資源対応力の向上と安定操業に貢献しており、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。